

199  
(in 1940)

*Extrait de*

RELATIONS  
ENTRE LES PHÉNOMÈNES SOLAIRES  
ET GÉOPHYSIQUES

COLLOQUES INTERNATIONAUX

Septembre 1947

EDITIONS DE LA *REVUE D'OPTIQUE THÉORIQUE ET INSTRUMENTALE*

165, Rue de Sèvres ; 3 et 5, Boulevard Pasteur, PARIS 15<sup>e</sup>

1949

## RECHERCHES SUR LA LUMIÈRE ZODIACALE

par A. DAUVILLIER

La lumière zodiacale est généralement considérée comme due à la lumière solaire diffusée par un amas lenticulaire de poussière cosmique dont le plan de symétrie équatorial coïnciderait avec le plan du système solaire et dépasserait l'orbite de la Terre. C'était déjà l'opinion de Laplace lorsqu'il la considérait comme un vestige de la nébuleuse ayant, selon lui, donné naissance au Système Solaire. Cette idée a été reprise par R. Mayer, H. Faye, von Seeliger, Fessenkoff, Jeffreys. D'autres auteurs Schmid, Hulbert, l'ont considérée comme un phénomène atmosphérique. C'était, pour S. Arrhenius, une sorte de queue cométaire terrestre, soufflée par la pression de la radiation solaire.

De Mairan, l'un des observateurs assidus de la lumière zodiacale au XVIII<sup>e</sup> siècle, l'attribuait à l'atmosphère du Soleil, qui se serait étendue jusqu'à l'orbite de Mars.

A. Hansky, à la suite de ses observations effectuées au Mont-Blanc, en 1905, fut le premier à lui attribuer une origine électrique et cette idée fut reprise par K. Birkeland, qui effectua même des expériences, avec une cathode aimantée disposée dans un tube à vide, pour en reproduire l'aspect.

Cette théorie a acquis beaucoup de vraisemblance depuis que l'on sait que l'électron libre diffuse la lumière de telle sorte que le spectre de la lumière diffusée est identique à celui de la lumière incidente et l'on a de bonnes raisons de croire que la lumière zodiacale n'est pas autre chose que le prolongement de la couronne solaire. Ces deux phénomènes seraient ainsi attribuables à l'émission électronique du Soleil, diffusant la lumière de la photosphère. C'était déjà, au XVII<sup>e</sup> siècle, un peu l'opinion de J. D. Cassini, lorsqu'il la considérait comme le prolongement des « franges » de Kepler du Soleil éclipsé. Cassini avait établi une corrélation entre sa visibilité et l'importance des taches solaires. De Mairan établit une corrélation entre la brillance de la lumière zodiacale et la fréquence des aurores polaires, fréquentes en France au XVIII<sup>e</sup> siècle.

La théorie électronique de la couronne, développée par C. Störmer, a montré que son aplatissement dans le plan du système solaire était dû à l'action directrice d'un champ magnétique solaire dont l'axe coïnciderait avec l'axe de rotation du Soleil. Birkeland, voulant établir la réalité de cette nature électrique de la lumière zodiacale, a discuté attentivement la plupart des observations qui avaient été publiées, dans le but de démontrer l'existence de variations dans l'intensité, la forme et l'étendue de cette lueur. Ces variations ont été signalées depuis longtemps par Cassini, De Mairan, A. de Humboldt, F. Arago, G. Jones, F. Mascart, Honorat, ..., mais ont été niées par

E. Liais, E. Heis, E. Marchand, B. Fessenkoff, ..., qui les ont attribuées aux variations de la transparence atmosphérique ou à des conditions d'observation défectueuses.

Si la lumière zodiacale est sujette à de telles variations, il n'est, en effet, plus possible de l'attribuer à un nuage de poussière cosmique ou, plus exactement — à cause de sa polarisation — à une nébulosité gazeuse environnant le Soleil.

Dans le but d'établir la réalité de ces variations, Birkeland fit des observations en Égypte à l'Observatoire d'Hélouan et, pour s'affranchir des incertitudes de l'observation visuelle, effectua des enregistrements par photométrie photoélectrique. Il utilisait une cellule photoélectrique d'Elster et Geitel, associée à un électromètre à torsion de Cramer à enregistrement photographique. Il ne donna cependant aucune description de ses expériences, considérant, sans doute, celles-ci comme préliminaires, et se borna à reproduire <sup>(1)</sup> une courbe d'intensité décroissante, montrant effectivement des oscillations importantes, relevée le 16 mars 1915 à Hélouan entre 19 h 19 et 20 h 35

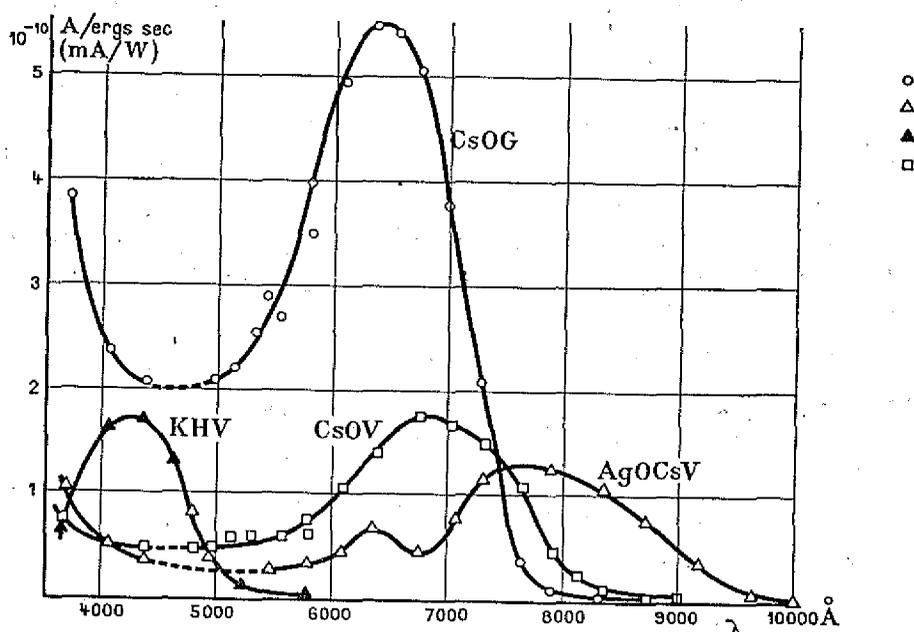


FIG. 1. — Courbes de sensibilité spectrale des cellules photoélectriques utilisées pour la mesure de l'intensité de la lumière zodiacale et des diverses composantes de la luminescence nocturne.

(heure locale). Ces oscillations, très prononcées, ont une période de quelques minutes. Ces expériences furent interrompues par la fin tragique de leur auteur au Japon en 1917 et ne furent, à notre connaissance, jamais publiées *in extenso*. Il est donc difficile de porter un jugement sur leur valeur. Elles étaient effectuées avec un matériel très primitif, mais par un expérimentateur d'une habileté consommée.

L'observation de la lumière zodiacale est difficile et ne peut être effectuée sûre-

(1) K. BIRKELAND : *Arch. Sc. Phys. Nat.*, 41, p. 22-37 (janvier 1916) et p. 109-124 (février 1916).



Moyennant ces indispensables précautions, le spot du galvanomètre enregistreur trace, dans l'obscurité, un zéro rectiligne à quelques dixièmes de millimètre près,

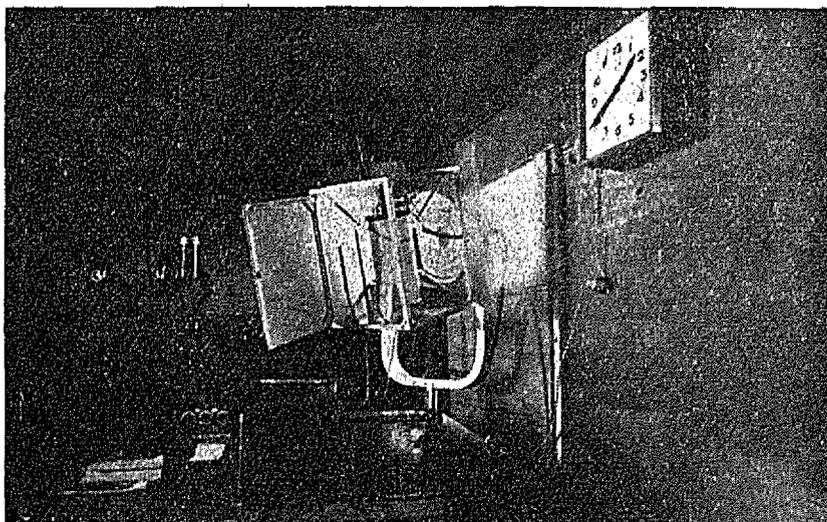


FIG. 3. — Vue du photomètre photoélectrique enregistreur.

pendant des périodes atteignant 12 heures consécutives. La figure 4 représente ainsi un enregistrement à l'est de l'intensité de la lumière du ciel nocturne ( $3\ 500 < \lambda < 5\ 000 \text{ \AA}$ ), effectué les 26-27 novembre 1946 au Pic-du-Midi entre 19 h 1/2 et

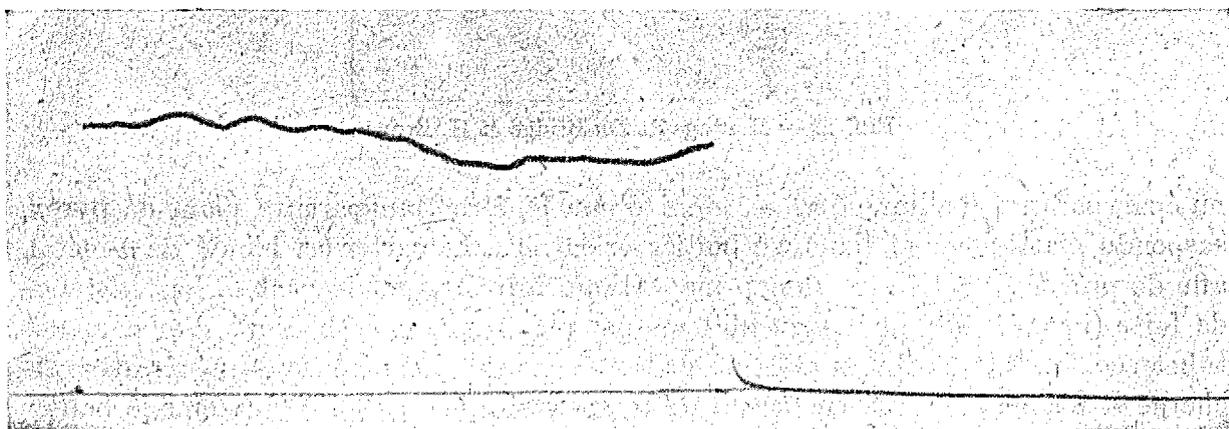


FIG. 4. — Exemple d'enregistrement de l'intensité de la luminescence nocturne dans le bleu (26-27 nov. 1946, 19<sup>h</sup>30 à 2<sup>h</sup>30).

2 h 1/2, le zéro étant tracé jusqu'à 8 h. Les marques horaires sont obtenues par extinction du spot durant 1 minute au moyen d'une horloge.

La sensibilité atteint quelques divisions millimétriques par millivolt, avec un galvanomètre de constante  $10^{-8}$  ampère par millimètre. Elle est amplement suffisante et

est réglée de telle sorte que le spot pénètre dans le champ d'enregistrement (étendue 100 mm) dès la fin du crépuscule astronomique.

L'appareil a d'abord été expérimenté en 1937 à l'Observatoire de Ksara, au Liban, par MMrs Combier et Delpout, qui lui ont apporté des perfectionnements et ont reconnu l'action inattendue du magnétisme terrestre. Il est installé depuis 1938 à l'Observatoire du Pic-du-Midi, où il est possible d'effectuer annuellement quelques dizaines d'observations parfaites. La difficile observation de cette lueur en plaine a pu faire croire que son apparition était capricieuse et incertaine. Au Pic-du-Midi elle apparaît, au contraire, invariablement, lorsque les conditions atmosphériques de visibilité sont bonnes. Sa brillance y excède toujours celle de la Voie Lactée. Il n'y a pas de nuits sans lumière zodiacale, tandis qu'il y a, dans les régions polaires, des nuits sans aurores polaires.

La température pouvant s'abaisser en hiver à  $-30^{\circ}\text{C}$  à l'extérieur et à  $-15^{\circ}$  dans le laboratoire, l'appareil enregistre l'intensité de la lueur à travers une double glace, dont l'espace intermédiaire est chauffé électriquement pour prévenir tout givrage. Les mesures sont effectuées, le soir, à l'ouest, de janvier à mai, et le matin, à l'est, de septembre à janvier. La figure 5 montre une vue du laboratoire. Les enregistrements



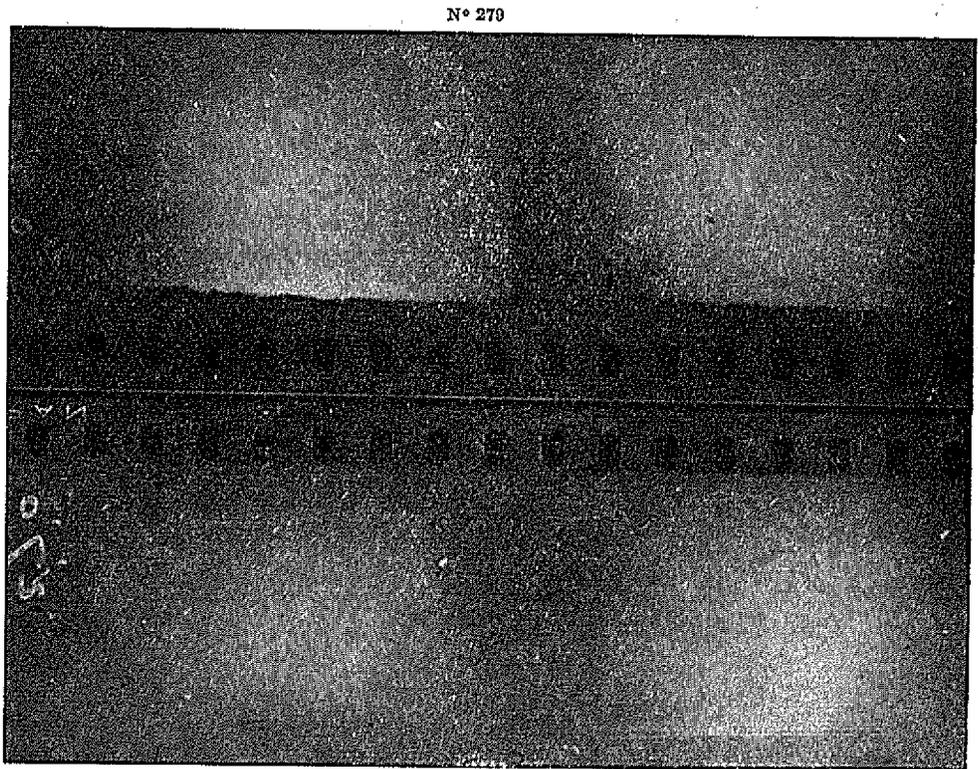
FIG. 5. — La cabine d'observation à l'Observatoire du Pic du Midi.

sont poursuivis durant 3 heures. L'appareil possède un champ de  $25^{\circ}$  d'ouverture et est braqué ( $11^{\circ}$ ) au-dessus de l'horizon.

Un deuxième appareil a été réalisé. Il comporte un multiplicateur électrostatique d'électrons à grande surface cathodique ( $20\text{ cm}^2$ ), sur laquelle un objectif ( $D = 9\text{ cm}$ ,  $f = 13\text{ cm}$ ) projette une image de la lumière zodiacale. Il est alimenté par une batterie d'accumulateurs au nickel-cadmium de 1 000 volts. Le courant est enregistré par un galvanomètre Tinsley à cadre tendu, 4 fois plus sensible que le

précédent, enregistrant sur papier photographique de grand format (13 × 30 cm). Le tube est disposé dans un boîtier orientable situé au centre d'une coupole en plexiglas de 82 cm de diamètre, si bien qu'il sera possible d'enregistrer aisément, au solstice d'hiver, la lumière zodiacale le soir et le matin.

L'étude des variations de l'intensité de la lumière nocturne au Pic-du-Midi <sup>(3)</sup> nous a montré que celle-ci était beaucoup plus constante dans le bleu que dans le rouge. La mesure de l'intensité de la lumière zodiacale est donc effectuée avec des cathodes insensibles à la lumière rouge. La cellule la plus utilisée comporte une cathode à l'hydrure de potassium dans le vide et le multiplicateur d'électrons une cathode de césium adsorbé sur antimoine ( $3\ 000 < \lambda < 6\ 000 \text{ \AA}$ ).



N° 270

FIG. 6. — Photographies de la lumière zodiacale (N° 279). En haut, à droite : le 13 février 1945 à l'ouest : 19<sup>h</sup>-19<sup>h</sup>3 (crépuscule) ; à gauche : 19<sup>h</sup>3-19<sup>h</sup>6.

(N° 270) En bas, à gauche : le 27 novembre 1944 à l'est : 5<sup>h</sup>22-5<sup>h</sup>25 ; à droite : 5<sup>h</sup>25-5<sup>h</sup>28 (aube). On note l'effet de l'absorption atmosphérique et l'apparition, tout à fait indépendante et distincte, de l'aube ou du crépuscule.

Ces mesures sont contrôlées par des photographies effectuées sur film panchromatique au moyen d'un objectif Saphir-Boyer ( $F/1,4$ ) ajusté sur un appareil Leica. Les clichés, posés 3 minutes, sont pris toutes les demi-heures. Ces films permettent de con-

<sup>(3)</sup> A. DAUVILLIER : *C. R.*, 219, p. 283-285 (septembre 1944).

trôler l'état du ciel, la forme, l'étendue et la brillance de la lueur. La figure 6 montre des lumières zodiacales du soir (ouest) et du matin (est), photographiées juste après la fin du crépuscule et juste avant l'aube. Quelques centaines de clichés ont été obtenus en position fixe ou sur monture équatoriale. Ils montrent nettement le lever et le coucher de la lueur, fixent sa position par rapport aux étoiles et montrent son déplacement au cours de l'année. Des photographies ont également été prises sur plaques Super-Fulgur avec un objectif Lacour-Berthiot en quartz-uviolet ouvert à  $F/1,6$ , aimablement mis à ma disposition par Mr Comandon. Pour le même temps de pose, le contraste est inférieur, par suite de la diffusion par l'atmosphère de la lumière bleue et ultraviolette du ciel nocturne. Nous avons, enfin, tenté la cinématographie de la lumière zodiacale, jamais encore réalisée. L'appareil construit à cet effet par Mr Perrotey, collaborateur technique, comporte un objectif Saphir-Boyer ( $F/1,9$ ) de 25 mm de longueur focale, couvrant le format cinématographique usuel (18 × 24 mm). Le film est brusquement avancé de 1 vue toutes les 3 minutes, par le jeu d'un électro-aimant actionnant une croix de Malte, contrôlé par un contacteur à mouvement d'horlogerie (film Agfa Superpan ou Kodak Super XX). La pose est effectuée durant 3 heures consécutives. En doublant le nombre des images positives, on peut projeter un film très court, fortement accéléré, montrant, le matin, la croissance quasi « exponentielle » de l'intensité de la lueur, son développement en étendue et l'apparition de l'aube, phénomène subit très distinct de la lumière zodiacale, mais souvent confondu avec elle par des observateurs peu avertis. La valeur didactique d'un tel film, qui a été monté par Mr J. Leclerc, n'a pas besoin d'être soulignée.

Seules 124 courbes photométriques ont été retenues. Pour comparer quotidiennement les valeurs de l'intensité de la lueur, on relève l'ordonnée de la courbe un quart d'heure après la fin du crépuscule astronomique, déduction faite de la lumière nocturne. Celle-ci est variable et est du même ordre de grandeur que l'intensité de la lumière zodiacale dans le champ d'enregistrement. On mesure son intensité après extinction de la lumière zodiacale, ou en orientant pendant quelques instants l'appareil en dehors de la lueur. Cette intensité sera exprimée, dans ce qui suit, en unités arbitraires.

D'une manière générale, et contrairement au résultat de Birkeland, les courbes obtenues par conditions parfaites de visibilité sont fort régulières et ne présentent aucune ondulation. Les mesures visuelles avaient montré à certains observateurs des palpitations rapides de la lumière zodiacale. A. de Humboldt dans son « Kosmos » rapporte des affaiblissements de la lueur, suivis de reprises soudaines. Il a parfois vu « la pyramide lumineuse traversée par une rapide ondulation ». G. Jones, qui l'a longuement observée au Japon et dans de multiples traversées du Pacifique, effectuées entre 1853 et 1855, a noté de nombreuses variations brusques. Nous en avons, nous-même, observé visuellement deux cas au Pic-du-Midi, mais nous les tenons pour subjectives. Les courbes photométriques ne montrent aucune variation rapide, tandis que la scintilla-

tion de Vénus au voisinage de l'horizon est fort bien décelée. C'est ainsi que la figure 7 (n° 120) reproduit un enregistrement, effectué le 7 mars 1943 à partir de 19 h 30, montrant une forte scintillation due à Vénus peu avant son coucher. Une palpitation rapide est d'ailleurs invraisemblable, même dans l'hypothèse électronique, car elle



FIG. 7. — Enregistrements de l'intensité de la lumière zodiacale : n° 371 : Ciel cirreux ; n° 120 : scintillation de Vénus.

correspondrait à la propagation de nuages d'électrons solaires s'éloignant avec une vitesse supérieure à celle de la lumière.

Quelques rares enregistrements (13 cas), effectués par ciel pur, nous ont montré (fig. 8, n° 198) des variations lentes dont l'interprétation est délicate. Ces oscillations

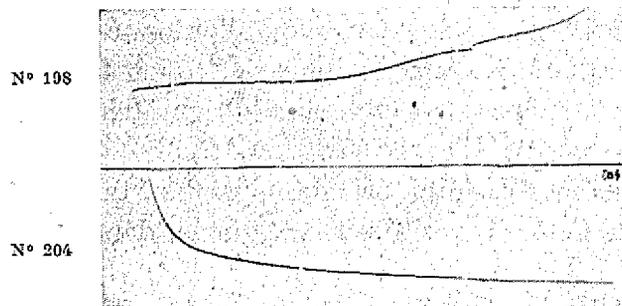


FIG. 8. — Enregistrements de l'intensité de la lumière zodiacale : n° 198 : fluctuations lentes (la petite discontinuité est due à la correction d'orientation de l'appareil effectuée par l'observateur) ; n° 204 : courbe normale.

ont une période de l'ordre d'une dizaine de minutes. Des accidents négatifs ne pourraient être causés par l'apparition, fugace, de voiles cirreux invisibles, car l'expérience montre qu'il faut des cirri sombres et étendus, fort apparents, pour causer des accidents de pareille amplitude. La figure 7 représente, par exemple, une courbe (n° 371) enregistrée le 31 mars 1946, à partir de 18 h, par un ciel manifestement cirreux, aussi bien visuellement que d'après les photographies.

Des variations de l'intensité du ciel nocturne dans la même région spectrale et dans la même direction ne sont pas exclues (voir fig. 4), bien que la brillance nocturne soit simultanément contrôlée dans une direction voisine par un deuxième appareil enregistreur. Les enregistrements effectués simultanément dans la même région spectrale dans deux directions différentes, montrent des variations qui ne sont pas toujours synchrones. La luminescence nocturne apparaît comme due à des nuages actifs en évolution constante dans l'espace et dans le temps, si bien que ces rares variations peuvent lui être attribuées.

Notre statistique, malheureusement fragmentaire du fait des intempéries et des périodes de Lune, montre que l'intensité de la lumière zodiacale peut demeurer sensiblement constante durant des périodes de plusieurs mois, ou présenter, par contre, de fortes variations d'un jour à l'autre. C'est ainsi que la période s'étendant du début de janvier à la fin d'avril 1944, a montré une lueur assez constante, à  $\pm 15\%$ , puis décroissant régulièrement. Par contre, la période s'étendant du 15 février au 15 avril 1943 a montré une agitation considérable, l'intensité pouvant passer de 92 à 20. Ces variations suivent celles de l'activité solaire. L'intensité varie parfois du simple au double d'un jour au suivant et, plus rarement, du simple au quadruple — ainsi que l'intensité de la luminescence nocturne dans le rouge. L'intensité maximum (92) a été observée le 1<sup>er</sup> mars 1943 à 20 h, tandis qu'une aurore polaire était signalée à Zagreb le 27 février et que la Comète Whipple-Fedtke présentait un brusque regain d'activité le 28. Exceptionnellement forte le 1<sup>er</sup>, elle était normale le soir précédent et le soir suivant. Pendant les *nuits claires* des 6 décembre 1942 et 31 août 1943 la lumière zodiacale avait des contours indistincts et l'appareil indiquait une intensité minimum, peut-être parce qu'elle s'étendait au ciel tout entier. C'est durant la nuit claire du 23 au 24 décembre 1944 qu'elle a présenté l'intensité minimum. Par contre, l'intensité de la luminescence nocturne était maximum (66) dans le même domaine spectral, ainsi que dans le rouge. De faibles manifestations aurorales, de brillance égale au double de celle de la Voie Lactée, étaient perceptibles au-dessus des horizons nord et est. Ces variations sont à rapprocher de celles de la couronne. Les éclipses totales n'avaient montré aucune variation de forme durant une vingtaine de minutes (stations multiples), mais le coronographe a décelé des changements dans la couronne interne, exigeant plusieurs heures pour se manifester.

Il est très difficile de dire si l'intensité de la lumière zodiacale suit le cycle undécennal solaire, par suite du caractère fragmentaire de la statistique. On observe parfois de très fortes lueurs zodiacales en période de minimum et de faibles lueurs en période de maximum. Cela n'est pas surprenant si l'on admet que la lumière zodiacale n'est autre que le prolongement de la couronne solaire, car la forme de celle-ci dépend étroitement de l'activité. En période de minimum, les jets de la couronne sont localisés et concentrés vers l'équateur solaire, ce qui contribue à renforcer la lumière zodiacale.

L'intensité *moyenne* semble cependant avoir augmenté depuis 1944, en liaison

avec l'activité solaire. Alors qu'elle décroissait lentement (de 30 à 24) durant le printemps de 1944 et demeurait constante (15) durant l'automne, elle a augmenté durant l'automne 1945 et le printemps 1946 (25) et croît actuellement.

La latitude du Pic-du-Midi (43°N) se prête particulièrement bien à l'observation de la lumière zodiacale durant les mois avoisinant le solstice d'été. Au solstice, la nuit y dure 4 heures, pendant lesquelles la lune s'observe au-dessus de l'horizon nord. Elle est parfois dissymétrique (1943), étant plus étendue vers le nord-ouest. L'écliptique étant couché sous l'horizon, la lumière zodiacale est, dans ces conditions, observée latéralement et normalement au fuseau habituel.

Nos observations visuelles confirment de grandes variations de forme de la lumière zodiacale. Celle-ci est parfois notée « longue et effilée », parfois « diffuse », parfois

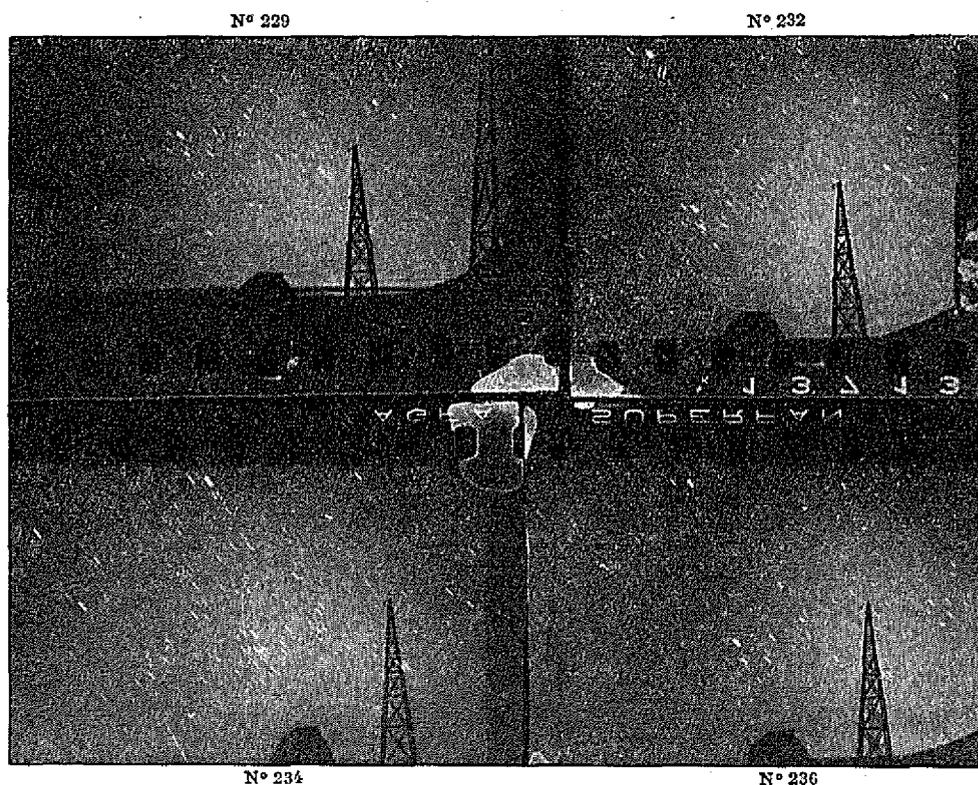


FIG. 9. — Photographies de la lumière zodiacale montrant des changements de forme et d'orientation :

N° 229 : 19 avril 1944 à 20<sup>h</sup>20 ; n° 232 : 21 avril 1944 à 20<sup>h</sup>25 ; n° 234 : 22 avril 1944 à 20<sup>h</sup>30 ; n° 236 : 23 avril 1944 à 20<sup>h</sup>30.

ramassée en forme de « boule » lumineuse. On note fréquemment une « aile » diffuse, s'étendant souvent loin vers le nord, tandis que la terminaison australe est toujours mieux délimitée.

L'observation visuelle et les photographies montrent nettement l'influence de l'absorption atmosphérique, qui se fait sentir au ras de l'horizon (fig. 6).

Les photographies ont montré d'importantes variations de position de la lueur d'un jour au suivant par rapport aux repères stellaires ou terrestres. C'est ainsi que les 21, 22 et 23 avril 1945, le déplacement est devenu particulièrement apparent grâce à la présence, dans le champ d'observation, d'un grand pylône éloigné se silhouettant sur le fond du ciel. Tandis que le 21 (fig. 9, n° 232) ce pylône se centre sur la lueur, celle-ci apparaît à la même heure le 22, (n° 234), entièrement au sud du pylône et le 23 (n° 236), le débordant nettement au nord. Le déplacement est aussi très net par rapport aux étoiles, en particulier par rapport à l'Amas des Pleiades.

On a beaucoup discuté sur l'orientation de la lumière zodiacale. En réalité, l'axe de cette lueur n'est pas fixe par rapport aux étoiles et peut varier de plusieurs degrés par rapport à l'écliptique. C'est ainsi qu'une observation du 3 octobre 1943 nous montre l'axe de la lumière zodiacale s'écartant de  $3^{\circ}$  vers le nord par rapport à l'écliptique. Les clichés de la figure précédente confirment les variations rapides de position auxquelles est sujette la lueur.

Nous considérons la lueur anti-solaire comme le prolongement de la lumière zodiacale vue en perspective au delà de l'orbite de la Terre. Nous n'avons pas effectué de mesures sur cette lueur d'observation difficile, bien moins brillante que la lumière zodiacale. Nous l'observons au Pic, en automne, sensiblement située sur l'écliptique, sous l'aspect d'une luminosité diffuse d'axes approximativement égaux à  $7^{\circ}$  et  $12^{\circ}$ , tantôt très visible, tantôt à peine perceptible (16 observations positives). Elle est plus apparente lorsque la luminosité zodiacale est forte.

En résumé, nos observations et nos mesures sont favorables à l'hypothèse électronique et écartent l'hypothèse classique. La lumière zodiacale nous apparaît ainsi comme l'intermédiaire existant entre les phénomènes solaires et les phénomènes géophysiques associés : magnétisme terrestre et aurores polaires, ce qui justifierait l'importance primordiale que nous lui attribuons.